

単純な橋梁モデルの固有振動および減衰特性に関する基礎的検討

A fundamental study on natural vibration and damping characteristics
of a simple model for bridges

中島章典*, 内川直洋**, 斉木 功***

Akinori NAKAJIMA, Naohiro UCHIKAWA and Isao SAIKI

*工博 宇都宮大学 工学部建設学科 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

**国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区北橋本町 2-1-4)

***博(工) 宇都宮大学 工学部建設学科 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Dynamic identification of structures, which identify deterioration of the structures by means of change of natural vibration characteristics, is paid attention to nowadays due to necessity of maintenance of structures. To this end, since improvement of accuracy of numerical simulation is required, proper modeling of the structures is one of the most important tasks. In this context, the natural vibration and damping characteristics are crucial for the simulation of the dynamic behavior of the structures. Hence, we examine the natural vibration and damping characteristics of a simple bridge model by experimental observation and numerical analysis with rigid-body-spring model.

Key Words : maintenance, dynamic identification, natural vibration, damping, rigid-body-spring model

キーワード : 維持管理, 動的構造同定, 固有振動特性, 減衰特性, 剛体ばねモデル

1. まえがき

現在, 地震, 風, 交通荷重などの作用により橋梁に生じる振動問題を, 橋梁の設計段階あるいは維持管理段階において数値解析手法を用いて検討し, これに対処しなければならない場合がある¹⁾. このような状況では, 対象構造をできるだけ精度良く再現できるようにモデル化することが重要である. また, 橋梁の劣化や損傷を, 振動特性の変化から同定しようとする考えは一般的であるが, 橋梁の局所的な劣化や損傷が全体系の振動特性に及ぼす影響は非常に小さいことが指摘されている^{2),3),4)}. そこで, 高次振動モード成分や部分構造の振動特性に着目する考え方の有効性が検討されてきている^{5),6)}. しかし, 以上のような手法の展開においても, 数値解析による検討が必要な場合には, 解析モデルによる実構造の再現性が重要な要因であることに変わりはない.

表-1 断面諸量

	試験体 1	試験体 2
断面の高さ (m)	1.185×10^{-2}	1.570×10^{-2}
断面の幅 (m)	1.995×10^{-2}	3.795×10^{-2}
単位体積質量 (kg/m^3)	7.815×10^3	7.795×10^3
質量 (kg)	3.695	9.289
弾性係数 (GN/m^2)	203.3	205.4

そこで本研究では, 振動問題の数値解析のために必要とされる実構造の正確なモデル化の基礎的検討の立場から, まず, 単純な橋梁モデルによる振動実験を行い, 数次の固有振動特性および減衰特性を調べた. 次に, 剛体ばねモデルを用いた固有値解析および時刻歴応答解析を行い, 得られた結果を実験結果と比較し, 支承のモデル化などを含む数値解析モデルによる実構造の固有振動数および減衰特性の再現性を定量的に検討した.

2. 自由振動実験

2.1 試験体詳細

本研究では, 図-1に示すような単純支持ばりを対象とし, 減衰自由振動実験を行なった. 試験体はスパン2000mmの一樣な矩形断面を持つ鋼材である. 本実験では断面寸法の異なる2種類の試験体について減衰自由振

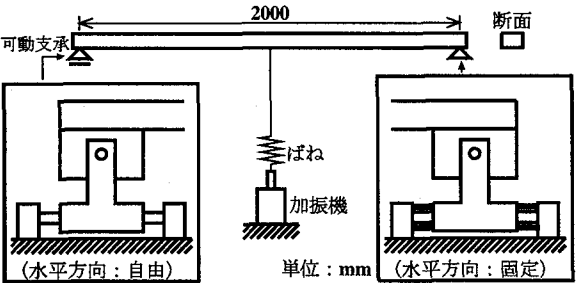


図-1 振動実験試験体

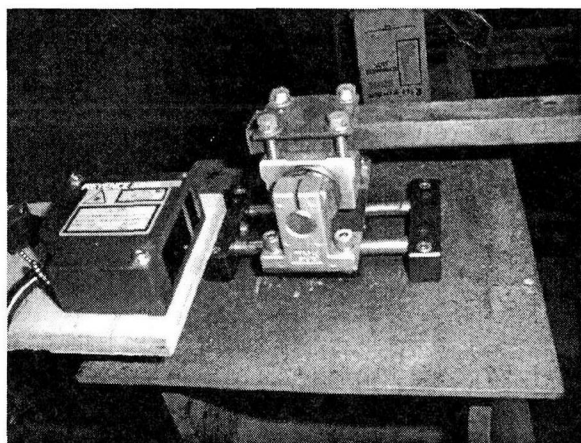


写真-1 可動支承部および非接触変位計設置状況

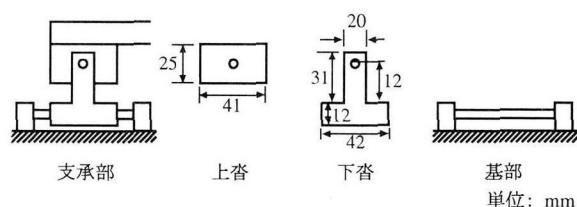


図-2 支承部詳細

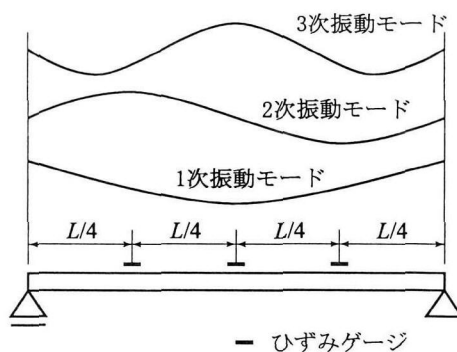
動実験を行なった。それぞれの試験体の断面寸法を材料試験から得られた弾性係数と共に表-1に示す。なお、試験体1および2は、実験、数値解析ともに同様の傾向が得られたため、これ以降は試験体1についての結果のみ示すこととする。

また、本実験で用いた支承は写真-1に示すような構造のものである。支承部は、その働きから、図-2に示ような上沓部、下沓部、基部の3種類にわけて考えられる。上沓-下沓間は鉛直、水平方向には拘束されているが、回転は自由である。一方、はり-上沓間では鉛直、水平方向および回転が拘束されている。一方の下沓-基部間は、水平方向のみ自由で可動支承を模擬し、もう一方の支承部では水平方向も拘束して固定支承を模擬している。また、支承部材の各質量は上沓部が137.7gであり、下沓部と基部は分解することが出来なかったため、各々の正確な質量を測定することは出来なかったが、下沓部と基部を合計した質量は478.4gであった。

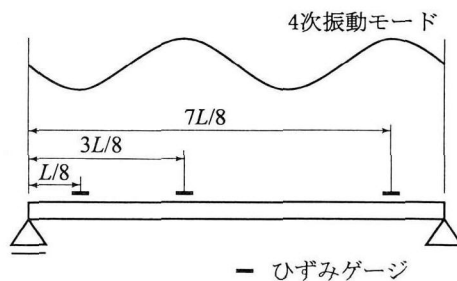
2.2 振動実験

(1) 実験方法

各振動モードの減衰自由振動時の挙動を調べるために、1次から4次の個々の振動モードを対象とした振動実験を行なった。各振動モード毎の振動特性を得るため、図-1に示すように、加振機により1次から4次の各振動モードの振幅の腹となる部分に、ばねを介してその固有振動数に近い値をもつ正弦波を入力し共振状



(a) 1次, 2次, 3次振動モードを対象とした実験



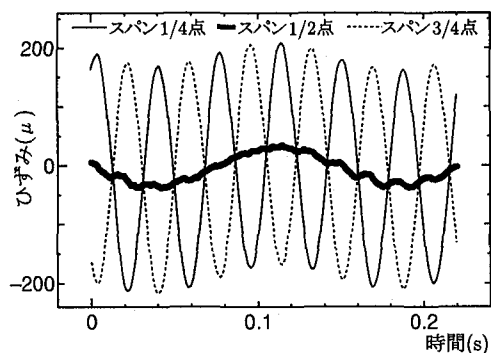
(b) 4次振動モードを対象とした実験

図-3 ひずみゲージ位置

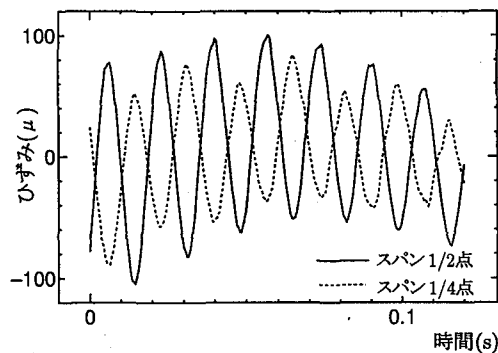
態を生じさせた。その後、加振機とはりをつなぐ糸を切断し、外力を取り除き減衰自由振動となった時の試験体各部のひずみ、可動支承の水平変位を測定した。加振機により正弦波を入力した位置は、1次振動モードから順に、可動支承部よりスパン長1/2, 3/4, 5/6, 5/8の各点である。加振機により入力する正弦波の振幅を一定とし、固有振動数の近傍で振動数のみを微小に変化させ、はりに生じるひずみの振幅が最大となる時の振動数で共振状態を生じさせた。

(2) 計測器具の設置位置、計測箇所、計測方法

本実験では、減衰自由振動状態におけるはりのひずみ、可動支承の水平変位を測定した。はりのひずみはひずみゲージにより測定し、その設置位置は、可動支承部よりスパン長1/8, 2/8, 3/8, 4/8, 6/8, 7/8の6点である。振動モードの節となる点を考慮し、1次から3次振動モードを対象とした実験においては、スパン長2/8, 4/8, 6/8の3点でのひずみの測定を行ない、4次振動モードを対象とした実験についてはスパン長1/8, 3/8, 7/8の3点でのひずみの測定を行なった。ここで、1次から3次の振動モードと計測したひずみゲージ位置の関係を図-3(a)に、4次振動モードと計測したひずみゲージ位置の関係を図-3(b)に示す。また、可動支承部の水平変位の計測には、変位計の接触による影響を避けるために、非接触式変位計を用いた。変位計の設置状況は写真-1により確認できる。各データのサンプリングレートは2000Hz、すなわち測定間隔は 5×10^{-4} s、測定データ数は16384、計測時間を8.192sとした。

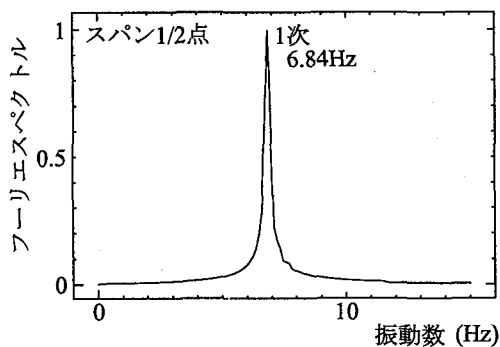


(a) 2次振動モード

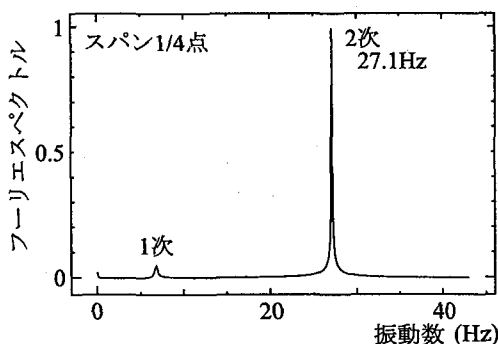


(b) 3次振動モード

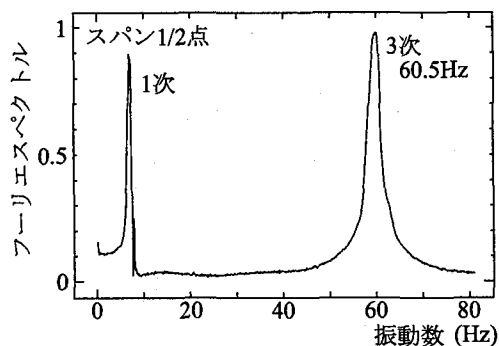
図-4 ひずみの時刻歴応答



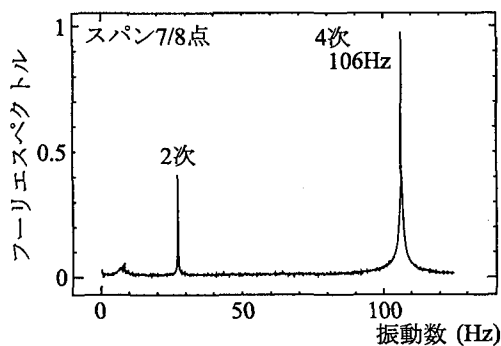
(a) 1次振動モード



(b) 2次振動モード



(c) 3次振動モード



(d) 4次振動モード

図-5 フーリエスペクトル

3. 実験結果

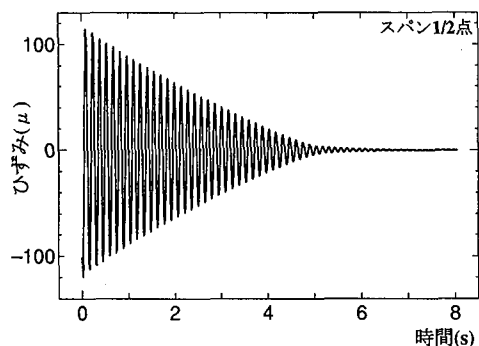
各振動モードを対象とした減衰自由振動実験から得られる振動は対象とした振動モードのみではなく、複数のモードが混合した複合波である。そこで、本研究ではフーリエ変換⁷⁾ および数値フィルタ^{6),8)}を用いて実験より得られた複合波から注目する振動モードのみの波形を抽出し、各振動モード毎に振動特性を調べた。1次から4次の振動モードを対象とした理由は、計測の分解能、実橋への適用における実用性、および対称、逆対称モードの比較のためである。

3.1 固有振動特性

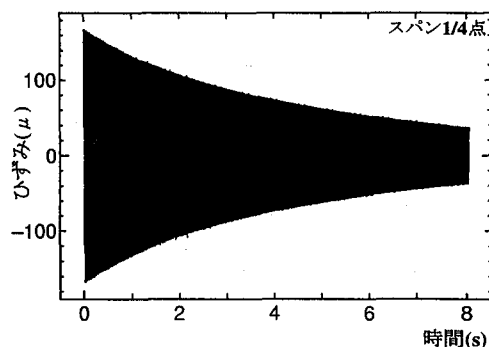
各計測点のひずみの時刻歴の例として、2次、3次振動モードを対象とした実験から得られた結果を図-4に

示す。ここで、2次モードを対象とした図-4(a)の結果から、スパン1/4点と3/4点が逆位相で振動するという特徴が見られると同時に、2次振動モードの節である、スパン1/2点にも振動が生じていることがわかる。これは、はりに生じている振動が対象とした振動モードのみの振動ではなく、他の振動モードとの複合振動となっているためである。これは3次、4次振動モードを対象とした実験についても同様である。

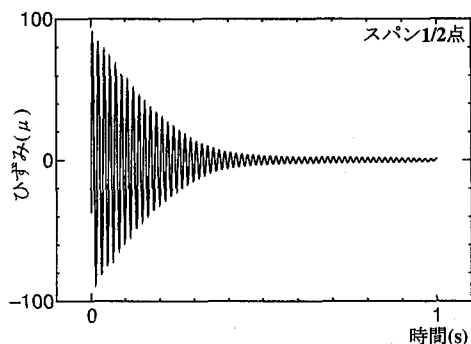
このような複合波から、実験に用いた単純はり構造の注目する振動モードの固有振動数を確認するために、離散フーリエ変換を行ないスペクトルを求めた。得られたフーリエスペクトルを図-5(a)~(d)に示す。縦軸のフーリエスペクトルは、相互比較のためピークでの値が1となるよう正規化している。また、図中の数値はスベ



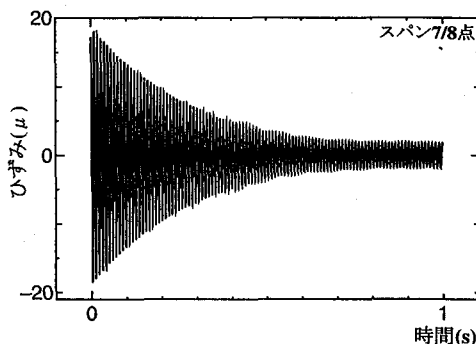
(a) 1次振動モード



(b) 2次振動モード



(c) 3次振動モード



(d) 4次振動モード

図-6 数値フィルタで処理したひずみの減衰自由振動波形 (実験結果)

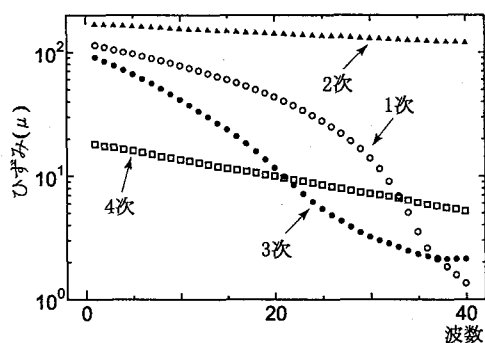


図-7 各振動モードにおける減衰性状の比較

クトルのピークでの振動数であり、各モードの固有振動数の値である。この図からも着目振動モード以外の振動モードが含まれていることがわかる。

3.2 減衰特性

本実験では、加振機により加振している各振動モードの共振状態ではなく、外力を取り除いた後の減衰自由振動状態を対象として、各振動モードごとの減衰特性を検討した。そのために、実験で得られた結果に対し数値フィルタを用いて、注目する振動モードの振動波形を取り出した。この結果を図-6(a)~(d)に示す。これらの図から、1次振動モードでは振幅が直線的に減衰し、2次振動モードでの減衰特性は1次振動モードと異なり、振幅が指数関数的に減衰するという差異が見られる。

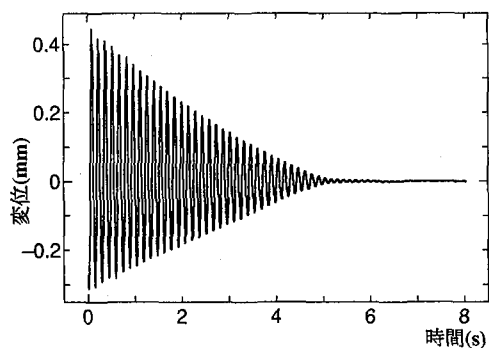
1次振動モードで見られるような直線的な減衰は摩擦減衰、2次モードに見られるような指数関数的な減衰は粘性減衰の特徴的な減衰特性である⁹⁾。このことから1次振動モードでは摩擦による減衰が支配的であり、2次振動モードでは粘性による減衰が支配的であると考えられる。また、4次振動モードは同じ逆対称モードである2次振動モードと同様の減衰特性を示すことがわかるが、3次振動モードは図-6からは摩擦、粘性のどちらの減衰が卓越しているかは判断しづらい。そこで、各振動モードのひずみ振幅の変化を計測開始から40波について図-7に片対数で示す。この図から、3次振動モードはひずみ振幅が大きい範囲ではひずみと波数が上に凸の関係となり、どちらかといえば同じ対称モードである1次振動モードに近い減衰特性を呈することがわかる。

なお、各振動モードに対して適用したバンドパスフィルタ幅は、1次振動モードから順に、1~13Hz, 20~35Hz, 53~68Hz, 99~114Hzである。

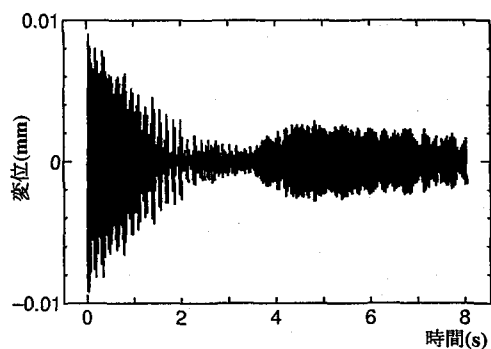
3.3 可動支承の水平変位

各振動モードの振動に起因する可動支承部の水平変位を調べるために、非接触型変位計により計測した下査部分の水平変位の時刻歴に対し、数値フィルタを用いて各振動モードごとの水平変位を抽出した。この結果を図-8(a)~(d)に示す。

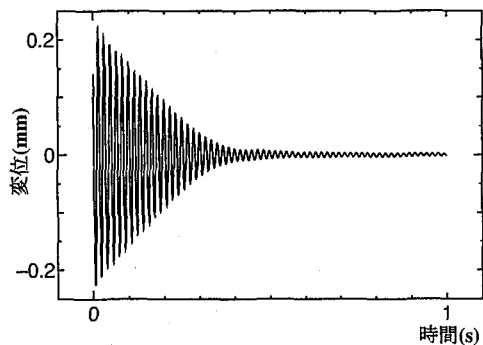
ここで、振動モードごとの水平変位の大きさに着目すると、モード次数が高くなるほど、水平変位振幅が小



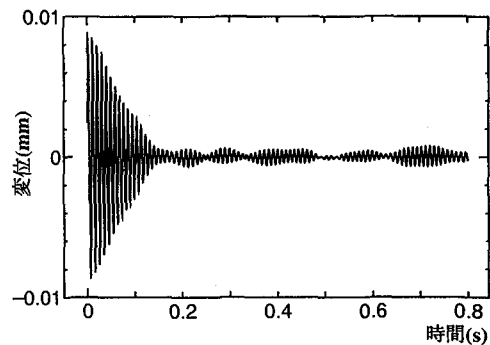
(a) 1次振動モード



(b) 2次振動モード



(c) 3次振動モード



(d) 4次振動モード

図-8 数値フィルタで処理した可動支承部水平変位の減衰自由振動波形 (実験結果)

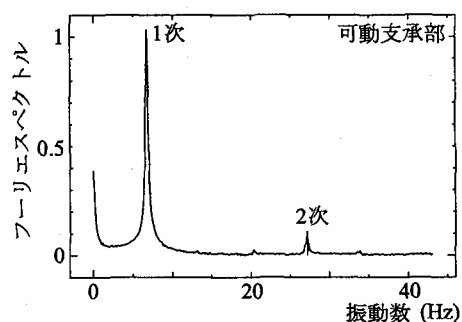
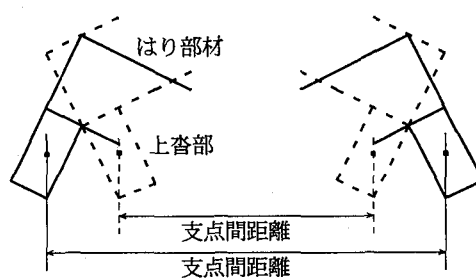


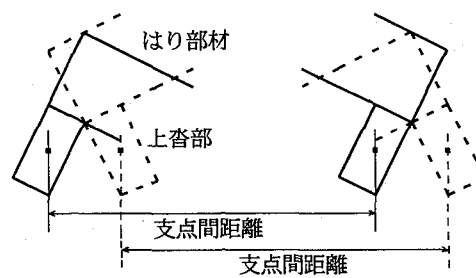
図-9 2次振動モードにおける可動支承部の水平変位のフーリエスペクトル

さくなるという傾向ではなく、対称モードである1次、3次振動モードに比べ、逆対称モードである2次、4次振動モードでは水平変位が1/20から1/40程度のオーダーと小さいという傾向が見られる。

また、スペクトルに着目すると、2次モードを対象とした実験におけるはりのひずみのスペクトルは図-5(b)に示すように2次に比べ1次振動モードの振幅は非常に小さいが、可動支部の水平変位のスペクトルは図-9のように1次振動の成分が大きくなっており、この結果から、1次振動モードに比べ、2次振動モードにおける支承部の水平変位は、はりの振動と相対的に比較して微小であることがわかる。このことは、3次、4次振動モードの比較においても同様の結果が得られた。



(a) 対称振動モード



(b) 逆対称振動モード

図-10 支点部の挙動

これらの対称、逆対称振動モードごとの水平変位の違いを生じさせる1つの要因として、支承部での挙動の違いが考えられる。対称モードである1次、3次振動モードにおいては、支点間距離は図-10(a)のように変化する。それに対して、逆対称モードである2次、4次振動

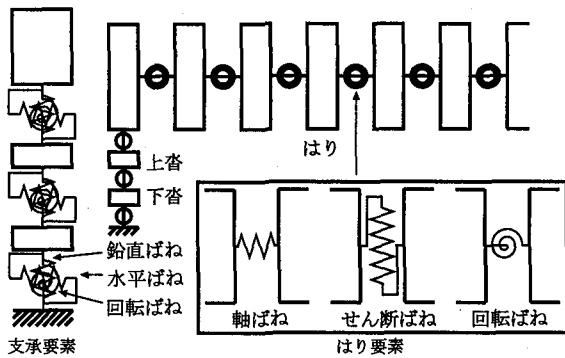


図-11 剛体間におけるばね要素形状

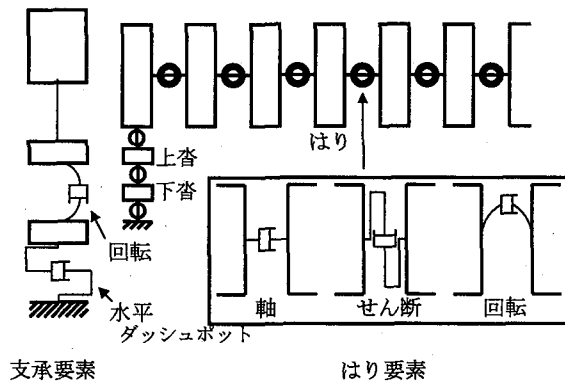


図-12 剛体間におけるダッシュポットの配置

モードでは、図-10 (b) のように振動するため、はり端部の回転による可動支承の水平変位は、対称モードに比べ小さくなると考えられる。

また、可動支承部の水平変位が、対称モードでは大きく、それに比べ逆対称モードでは非常に小さいため、逆対称モードでは可動支承部の摩擦による減衰が小さく、前節で述べたような振動モードごとの減衰特性を生じさせたものと考えられる。

4. 剛体ばねモデルによる複素固有値解析

本研究では、実験結果を踏まえて、実構造をより正確に再現する数値モデルの構築を試みる。そこで、実験に用いた試験体を図-11 に示すような剛体ばねモデル^{10),11),12)}によりモデル化した。材料の内部減衰、可動支承部の水平移動に起因する減衰、支承部の回転に起因する減衰は図-12 に示すようにダッシュポットによりモデル化した。これらのモデルを用いた複素固有値解析を行い、得られた結果を実験より得られた各振動モードの固有振動数とそれぞれ比較し、その再現性について検討する。

4.1 支承部のモデル化の検討

支承要素を考慮しない解析値および考慮した解析値と実験値の比較を図-13 に示す。なお、支承のモデル化に

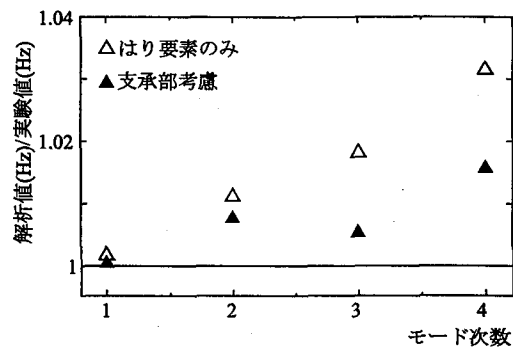


図-13 固有振動数の実験値と解析値の比較

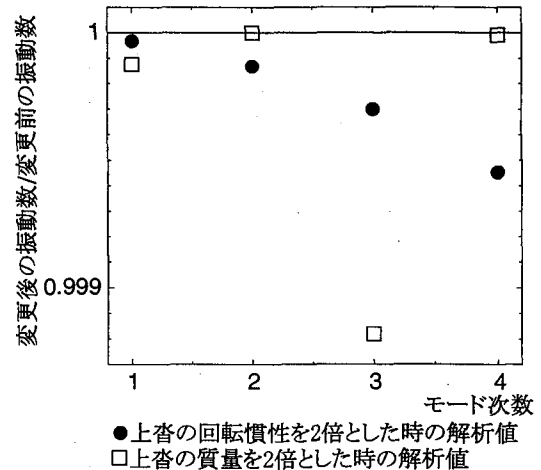


図-14 上沓の質量、回転慣性と振動数の関係

際して、下沓部は直方体と仮定し、質量は実測した体積から 400g と仮定した。縦軸は、それぞれの解析値を実験値で正規化した無次元量である。支承要素を考慮しない解析値は、Bernoulli-Euler はりに基づく解析解⁹⁾ に対して、4 次モードにおいても差異は 0.08% とほぼ一致している。しかし、この解析値は図-13 の結果を見ると、実験値に対して誤差のオーダーは小さいが、モード次数に伴って大きくなる傾向にある。

また、支承部を考慮した解析値と考慮しない解析値を比較すると、支点部を考慮することにより実験値に対する誤差は小さくなっており、各振動モードの誤差は一定の傾向で変化していないことがわかる。つまり、支承部の質量、回転慣性は各モードの固有振動数にそれぞれ異なる影響を及ぼしており、このことから構造物の動的挙動を正しくモデル化するには支承部の正しいモデル化が重要な要因であることがわかる。

ここで、支承部の質量、回転慣性が各振動モードの固有振動数にどのように影響するかを検討する。図-14 は上沓の質量、回転慣性をそれぞれ 2 倍の値とした時の振動数の解析値同士を比較した結果である。また、図中の縦軸は質量、回転慣性を変化させた時の振動数を変化させる前の振動数で無次元化した値であり、横軸はモード次数である。図-14 より、上沓の回転慣性が振動数に

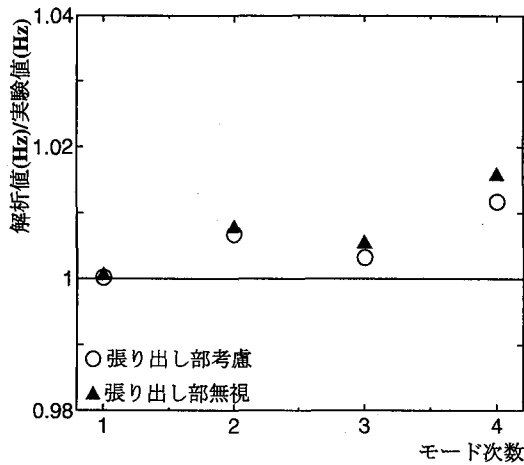


図-15 張り出し部考慮による解析値と実験値との比較

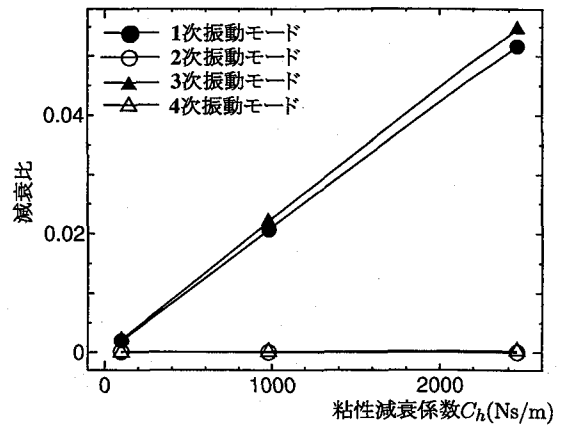


図-17 可動支承部の水平ダッシュポットの粘性減衰係数と減衰比の関係

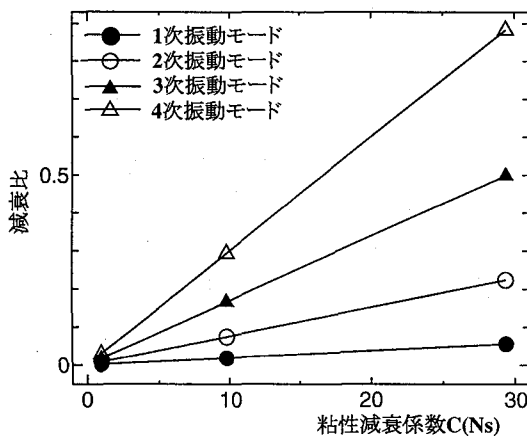


図-16 はり部材の回転ダッシュポットの粘性減衰係数と減衰比の関係

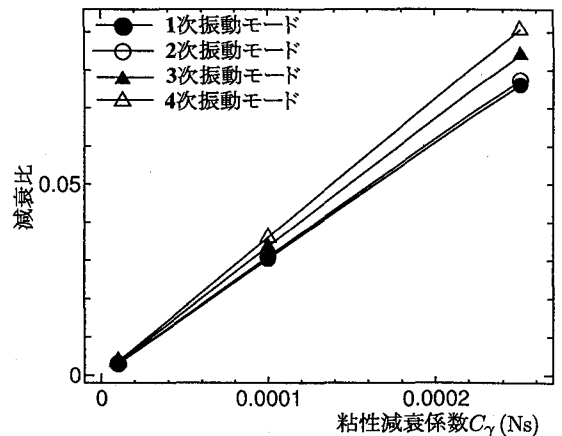


図-18 可動支承部の回転ダッシュポットの粘性減衰係数と減衰比の関係

及ぼす影響はモード次数が高くなる程大きいことがわかる。それに対して、質量は逆対称モードである2次、4次振動モードの振動数に与える影響が非常に小さいことがわかる。これらは、逆対称振動モードでは対称振動モードに比べ水平変位が小さいためであると思われる。紙面の都合上省略するが、下沓の質量も上沓のそれと同様の影響が観察された。

4.2 張り出し部のモデル化の検討

本試験体では、スパン2000mmに対し片側で1%強となる25mmの張り出しを有する。そこで解析モデルの支承の外側の張り出し部分が固有振動数に及ぼす影響を検討した。張り出し部分を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果を図-15に示す。この結果から高次になるほどその影響は大きく、4次モードにおいて0.5%程度の差異が生じており、動的挙動の正しいモデル化において無視できない要因であることがわかる。

4.3 各減衰要因に起因した減衰特性の検討

構造物の減衰は様々な要因で生じることがわかっており、減衰特性を把握するためには各要因について検討しなければならない。そこで、材料の内部減衰を軸、せん断、回転のダッシュポットを用いてモデル化した。また支承部での減衰要因としては、上沓部の上沓-下沓間の回転、可動支承部の下沓-基部間の水平移動に起因する減衰を考えるために、それらの位置にそれぞれダッシュポットを設置した。

ここでは、これらのダッシュポットの粘性減衰係数をパラメタとして変化させた複素固有値解析の解析値と実験結果との比較を行ない、それらの減衰が各振動モードの固有振動数、減衰特性に与える影響を検討する。ただし、はり内部のダッシュポットに関しては、影響が大きいと予想される回転ダッシュポットのみをパラメトリック解析の対象とした¹⁰⁾。

図-16に、はりの回転ダッシュポットの粘性減衰係数 C をパラメタとして複素固有値解析を行った際の各振動モードの減衰比を示す。この結果より、はりの内部減衰

による減衰は、振動モード次数が高くなるほど大きくなるということがわかる。

次に、可動支承部の下査-基部間の水平ダッシュポットの粘性減衰係数 C_h をパラメタとして複素固有値解析を行った際の各振動モードの減衰比を図-17に示す。図-17の結果に着目すると、可動支承部の水平移動に起因した減衰は、1次、3次の対称振動モードでは大きく、2次、4次の逆対称振動モードでは小さくなっており、その減衰の特性に差異が見られる。これらの特性の違いは、逆対称振動モードでは支承の水平変位が対称振動モードに比べ小さく、水平方向の移動によって生じる減衰が小さいことに起因すると思われる。

また、同様に、可動支承部の上査-下査間の回転ダッシュポットの粘性減衰係数 C_r をパラメタとして複素固有値解析を行った際の各振動モードの減衰比を図-18に示す。図-18をみると、支承の回転に起因した減衰は、振動モードが高くなるほど大きくはなっているが、はりの回転ダッシュポット、支承の水平ダッシュポットをパラメタとした時の結果と比べると、振動モードごとの減衰特性に及ぼす特徴的な影響はみられない。

次に、各複素固有値解析により算定された各モードの減衰比に着目し、実験結果との比較を行う。

摩擦減衰が支配的である1次、3次振動モードの実験結果からではその振動モードの減衰比は一意には求められないが、摩擦による減衰が小さく指数関数的な減衰特性をもつ2次、4次振動モードでの実験結果より求められた減衰比は2次モードでは0.001、4次振動モードでは0.005程度であった。この、4次振動モードでの減衰比が2次振動モードより大きいという実験結果と前述の解析結果を比較すると、図-16に示すはりの回転ダッシュポットの影響が実験結果と同様の傾向を示すことから、内部粘性がはりに生じる粘性減衰の支配的要因であると考えられる。

同様に、実験より得られた対称振動モードでは摩擦減衰が支配的であり、それに対し逆対称振動モードでは摩擦減衰の影響が小さいという各振動モードの減衰特性と解析結果を比較すると、図-17に示す支承部水平方向ダッシュポットの影響が実験結果と同様の傾向を示すことがわかる。本研究での当該部分の減衰機構のモデル化は摩擦ではなく粘性としているが、対称振動モードに特有の摩擦減衰は可動支承部の摩擦が支配的要因であると考えられる。これらの減衰要因は長尾らの研究¹³⁾において着目している減衰要因と対応している。

5. 剛体ばねモデルによる時刻歴応答解析

前節での固有値解析による支承部、張り出し部のモデル化の検討より、解析モデルにおいて支承要素、張り出し部を考慮することによって、実験より得られた各振動モードでの固有振動特性をより精度よく再現できること

がわかった。そこで、支承要素、張り出し部を考慮したこれらの解析モデルを用いて、各振動モードでの振動の減衰性状を再現するために減衰要因に即したモデル化を行ない、自由振動波形の時刻歴応答解析結果と実験結果の比較によりその再現性の検討を行なう。

5.1 解析方法

前節での複素固有値解析による各減衰要因に起因した減衰特性の検討より、本研究で用いた試験体における粘性減衰の主な要因は、はり部材の内部粘性であり、摩擦減衰の主な要因は可動支承部での摩擦であることがわかった。そこで、時刻歴応答解析を行なうにあたり、はり部材の内部粘性をはりの回転ダッシュポットを用いてモデル化した。ここで、はりの回転ダッシュポットの粘性減衰係数 C は、摩擦による減衰が小さく指数関数的な減衰特性をもつ2次、4次振動モードでの実験結果より得られた減衰比と整合するように、複素固有値解析より同定した。

実験結果より得られた減衰比は2次、4次振動モードでそれぞれ0.001、0.005程度であった。これに対し、本研究における時刻歴応答解析に用いた回転ダッシュポットの粘性減衰係数 C の値は0.147Nsであり、複素固有値解析より求められた各振動モードの減衰比は、2次、4次振動モードでそれぞれ0.0011、0.0044である。また、1次、3次振動モードでの減衰比はそれぞれ0.00028、0.00249である。

可動支承部での摩擦については、複素固有値解析においては摩擦による減衰力を、ダッシュポットによりモデル化した。このモデル化では、減衰の大きさについては再現することができるが、実験より得られた対称モードで振動が直線的に減衰するという傾向は再現できない。そこで、時刻歴応答解析では、下査-基部間の水平移動に際して、クーロン摩擦則にしたがう摩擦力

$$f = \mu N \frac{v}{|v|}$$

が作用すると仮定した。ここに、 v は下査-基部間の相対速度、 μ は摩擦係数、 N は垂直抗力である。ここでは、摩擦係数 μ は可動支承部の摩擦係数試験より0.021とし、垂直抗力 N は試験体重量の1/2とし、 $|f| = 3.95\text{N}$ となった。

はじめに各振動モードの振幅の腹となる部分の剛体にその振動モードの固有振動数をもつ正弦波外力を与え、その後外力をゼロとすることで、自由振動実験と同様な状態を再現した。また、時間積分についてはNewmarkの β 法を用い、時間刻みは0.001sとした。

5.2 解析結果

図-19(a)~(d)に各振動モードでの時刻歴応答解析結果を示す。図の縦軸は図中に示した着目点のひずみを表している。なお、これらの各振動モードの自由振動波形

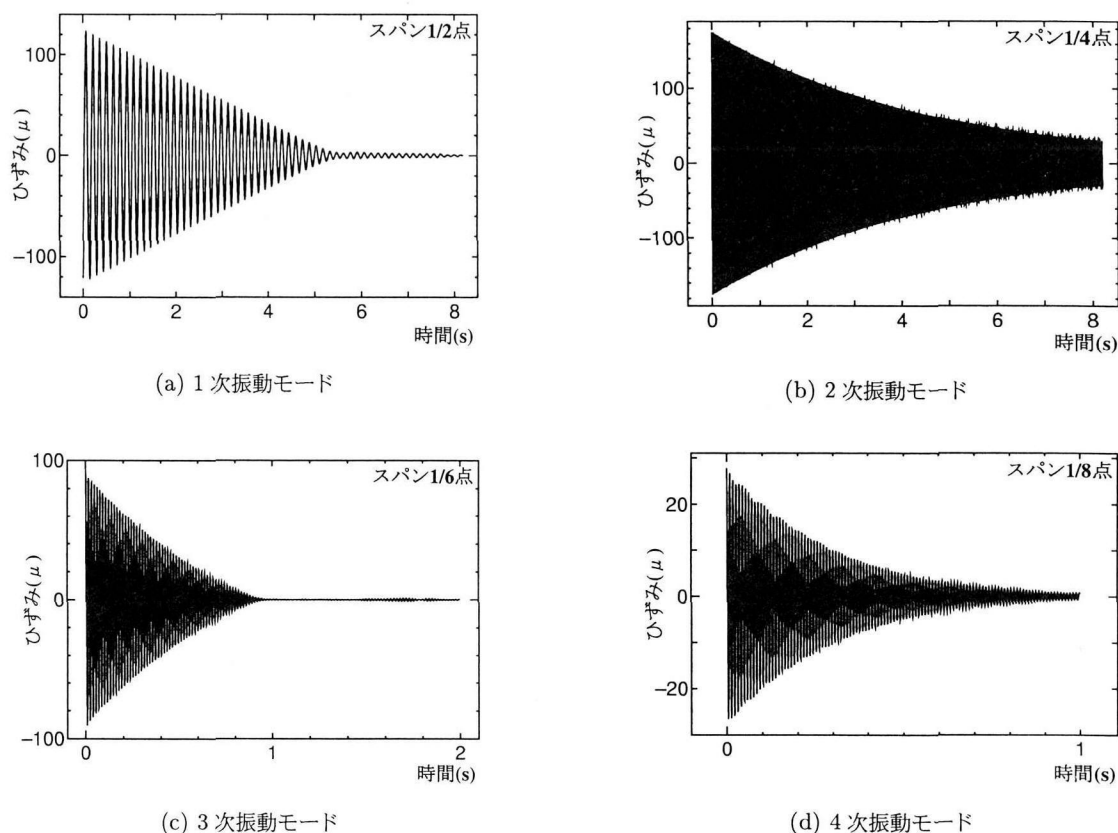


図-19 数値フィルタで処理したひずみの時刻歴応答解析結果

を得る際にも、数値フィルタを用いて着目するモード以外の振動を除いている。これらの図を図-6に示される実験結果と比較することにより、本解析モデルで対称振動モードでの直線的な減衰、逆対称振動モードでの指数関数的な減衰という振動モードごとの減衰特性を再現できていることがわかる。また、それぞれの実験結果と解析結果を比較すると、1次、2次振動モードでは減衰特性を定性的に再現できていると同時に、精度も非常に高いことがわかる。それに対して、3次、4次振動モードでは、定量的な精度は1次、2次に比べるとやや低いですが、実験での減衰の傾向は再現できていることがわかる。

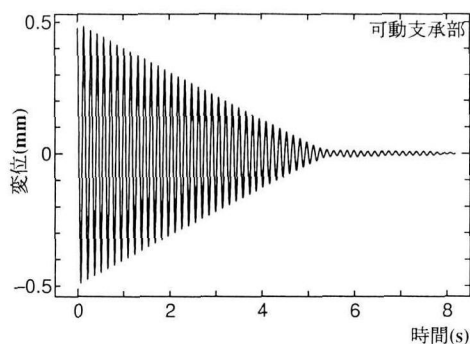
次に、本解析による可動支承部の水平変位の解析結果を図-20(a)~(d)に示す。これらの図より、逆対称振動モードでの水平変位は対称振動モードでの水平変位と比べると微小であり、実験より得られた対称、逆対称振動モードごとの水平変位の特性を、支承要素を考慮した本解析により再現できていることがわかる。本研究では、減衰の要因としてはりの材料内部粘性および可動支承部での摩擦に着目した。しかし、減衰の要因としてはそれ以外にも、支承部での回転による摩擦減衰、また支承部での粘性的な減衰、支承のがたつきによる減衰、空気抵抗による減衰など様々なものが考えられ、それらの減衰による影響をさらに検討することによって、3次、4次振動モードでの定量的な精度の向上が図られるものと思

われる。

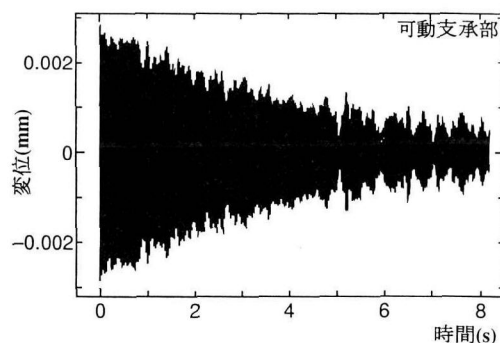
6. まとめ

本研究では、数値解析モデルによる実構造の振動問題の再現性を確認する立場から、まず、単純な橋梁モデルを対象として振動実験を行い、低次の各振動モードの固有振動特性および減衰特性を検討した。次に、剛体ばねモデル解析を用いて、実験モデルの固有振動特性を精度良く再現することを試みた。以上の検討を通して得られた結果を以下にまとめる。

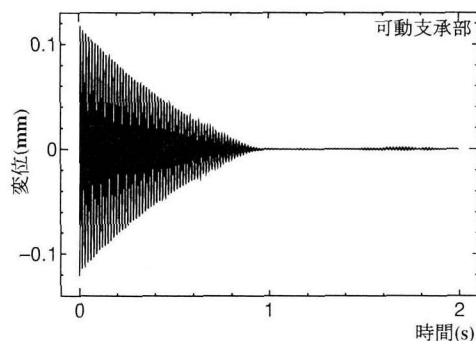
- 剛体ばねモデルを用いた数値解析により、実験モデルの1次から4次までの固有振動数を2%以下の誤差で再現することができた。この数値モデルでは、支承部分および張り出し部分のモデル化も考慮している。
- 自由振動実験結果から、1、3次の対称振動モードでは支承部の摩擦に起因した減衰性状を示し、2、4次の逆対称振動モードでは指数関数的な減衰性状を示すことが確認された。また、前者の減衰要因は摩擦減衰であり、後者の要因は内部粘性減衰であることを解析により定性的に説明した。
- 時刻歴応答解析において、1、2次振動モードについては、実験結果を精度よく再現することができた。3、4次振動モードについては、実験で得られ



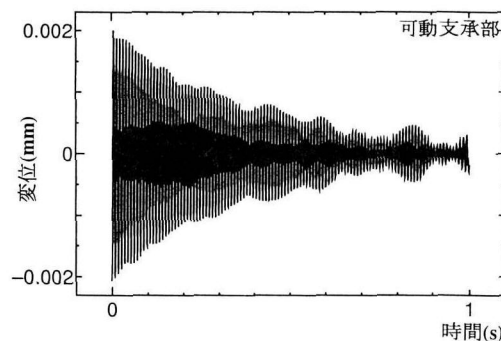
(a) 1次振動モード



(b) 2次振動モード



(c) 3次振動モード



(d) 4次振動モード

図-20 数値フィルタで処理した支承部水平変位の時刻歴応答解析結果

た減衰の定性的な傾向は再現することができたが、精度を高めるためにはさらに検討が必要である。

謝辞： 本研究の実施にあたり、北海道大学大学院の小幡卓司先生より、数値フィルタに関して貴重なご助言とプログラムの提供を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会・橋梁振動モニタリング研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，構造工学シリーズ 10，土木学会，2000.10.
- 2) 西村昭，藤井学，宮本文徳，加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学挙動の有効性，土木学会論文集，No.372/V-7，pp.75-84，1986.8.
- 3) 加藤雅史，高木保志，島田静雄：PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究，土木学会論文集，No.341，pp.113-118，1984.1.
- 4) 中島章典，阿部英彦，倉西茂：合成桁のずれ止め剛度の変化およびその範囲が固有振動数に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.37A，pp.957-964，1991.3.
- 5) 呉智深，原田隆郎，三宅博之：固有振動数の変化による大型構造システムの局所劣化同定法の提案，構造工学論文集，Vol.46A，pp.251-260，2000.3.
- 6) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，水草浩一：振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.531-538，2000.3.
- 7) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1976.
- 8) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，pp.33-48，1993.
- 9) 小坪清真：入門建設振動学，森北出版，1996.
- 10) 中島章典，土岐浩之：剛体ばねモデル解析を用いた桁橋の構造減衰特性に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.44A，pp.793-800，1998.3.
- 11) 川井忠彦，竹内則雄：離散化極限解析プログラミング，コンピューターによる極限解析法シリーズ 2，培風館，1990.
- 12) 都井 裕：鋼構造の離散化極限解析，コンピューターによる極限解析法シリーズ 3，培風館，1990.
- 13) 長尾 拓，山口宏樹，松本泰尚：桁橋の減衰特性と支承摩擦の影響に関する理論的考察の試み，第 55 回年次学術講演会，I-B75，2000.9.

(2001 年 9 月 14 日受付)